

University of Groningen

## Brane dynamics in diverse backgrounds

Eyras Jimenez, Eduardo Angel

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

1999

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Eyras Jimenez, E. A. (1999). Brane dynamics in diverse backgrounds. s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

## Samenvatting

De snaartheorie is een poging om de natuur te beschrijven op een wijze die de theorie van de zwaartekracht en van de elementaire deeltjes met elkaar in overeenstemming brengt. Elementaire deeltjes zijn de bouwstenen van de materie. Het bestuderen van deze deeltjes vindt plaats door hoog-energetische deeltjes tegen elkaar te laten botsen. Hoe groter de energie van de deeltjes, hoe gedetailleerder de structuur van de materie zichtbaar gemaakt kan worden. Het standaardmodel is een theorie die met succes de wisselwerking (elektromagnetische, zwakke en sterke interactie) tussen elementaire deeltjes beschrijft en overeenkomt met experimentele gegevens. Een theorie wordt als fundamenteel beschouwd als ze de deeltjes uitputtend beschrijft. Er zijn twee redenen waarom het standaard model niet fundamenteel is. Ten eerste bevat het te veel vrije parameters, zoals de massa's van de deeltjes die experimenteel moeten worden vastgesteld. In een fundamentele theorie zouden die uit het grondbeginsel moeten kunnen worden afgeleid. Ten tweede is er nog een vierde kracht, de zwaartekracht (gravitatie), waar het standaardmodel niet mee uit de voeten kan. Zwaartekracht is de wisselwerking die op lange afstanden overheerst, zoals in de dynamica van sterren- en zonnestelsels, waar quantum effecten geen rol spelen. Gravitatiele fenomenen worden door de algemene relativiteitstheorie beschreven als de dynamiek van de ruimtetijd. Hoewel de zwaartekracht verwaarloosd kan worden op de energieschaal van de andere drie krachten, wordt zij bij hogere energieën steeds belangrijker. Beide theorieën, het standaard model en de algemene relativiteitstheorie, beschrijven elk met succes de verschijnselen die op het gebied van hun geldigheid plaatsvinden.

Op een energieschaal boven die van het standaard model worden zowel quantumeffecten als gravitationele effecten relevant. Daarom is er behoefte aan een quantumtheorie die zowel gravitatie als de andere krachten beschrijft. Op deze energieschaal wordt de structuur van de ruimtetijd beïnvloed door quantum onzekerheden. Als voorbeeld van zo'n situatie nemen we een zwart gat. Een zwart gat kan beschouwd worden als een ster die zo massief is geworden dat zelfs licht er niet uit kan ontsnappen. Een zwart gat genereert kennelijk een heel sterke zwaartekracht. Als de grootte van het zwarte gat vergelijkbaar is met die van een deeltje van dezelfde massa, ontstaat er een paradox. Enerzijds bepaalt de algemene relativiteitstheorie de positie van het zwarte gat binnen een bepaalde straal (de Schwarzschild straal), anderzijds zegt de quantum mechanica dat er een onzekerheid bestaat ten aanzien van de positie van het deeltje, wat strijdig is met de bewering van

de algemene relativiteitstheorie. Deze paradox geldt op de Planckschaal  $\sim 10^{19} \text{ GeV}$ , die afgeleid kan worden door vergelijking van de grootte van het zwarte gat met de golflengte van het zwarte gat beschouwd als een deeltje. De lengteschaal die bij deze energie hoort, is zo klein dat er geen experimentele input mogelijk is. Daarom moet zo'n unificatie theorie gebaseerd zijn op universele fysische principes.

Snaartheorie heeft zich aangediend als een veelbelovende kandidaat voor de unificatie van de fundamentele krachten in de natuur. In de snaartheorie veronderstellen we dat de deeltjes in de Planck schaal ééndimensionale objecten zijn: snaren. Deze snaren bewegen zich in de ruimtetijd die *target space* genoemd wordt. Net zoals de beweging van een deeltje door een lijn kan worden weergegeven, kan de beweging van een snaar door een oppervlak worden weergegeven, de *worldsheet*. De unificerende eigenschap van de snaar is het gevolg van het feit dat de verschillende trillingen van een snaar corresponderen met verschillende deeltjes. Bovendien zijn in deze deeltjes de fundamentele vrijheidsgraden van de algemene relativiteitstheorie ook terug te vinden. De interacties tussen snaren corresponderen met het splitsen en het samengaan van snaren. Dientengevolge vinden interacties plaats op een oppervlak en niet in een punt. De formulering van snaartheorie is intrinsiek perturbatief. Dit wil zeggen dat interacties worden beschreven als een machtsontwikkeling in termen van de snaar-koppelingsconstante, die kleiner moet zijn dan 1. In geval van de niet-perturbatieve limiet, bij een koppelingsconstante groter dan 1, is niet volledig bekend hoe de interacties beschreven worden. Dit is onderwerp van actueel onderzoek.

Symmetrie is een essentiële eigenschap van snaartheorie. Er is sprake van symmetrie wanneer de theorie hetzelfde blijft na een bepaalde transformatie. Snaartheorie bevat veel symmetrieën en daardoor zijn resultaten gemakkelijker te bepalen omdat ze moeten voldoen aan deze symmetrieën. Zo bevat snaartheorie bijvoorbeeld de symmetrieën van zowel algemene relativiteit als elementaire deeltjesfysica, maar ook conforme symmetrie en supersymmetrie. Supersymmetrie is de symmetrie die bosonen en fermionen aan elkaar relateert. Wanneer we supersymmetrie eisen voor de snaartheorie, blijkt dat die uitsluitend in tien dimensies geformuleerd kan worden. Bovendien geeft de toevoeging van supersymmetrie vijf verschillende consistente type snaren die in tien dimensies bestaan. Dit zijn de open supersnaar (type I), twee gesloten supersnaren (type IIA en type IIB) en twee hybride gesloten supersnaren (heterotic). Alle vijf zijn even goed en zijn consistent in hun eigen perturbatieve regime. Dit wordt in Hoofdstuk 1 beschreven. We verwachten echter maar één unificatietheorie en niet vijf.

Om terug te kunnen gaan naar onze vierdimensionale wereld moet men veronderstellen dat zes van de tien dimensies zo klein zijn dat ze niet gemeten kunnen worden in hedendaagse experimenten. Een cilinder kan bijvoorbeeld worden opgevat als het produkt van een cirkel en een rechte lijn. Als de cirkel klein genoeg is, kan de cilinder benaderd worden door een rechte lijn. Op soortgelijke wijze kunnen we de tien-dimensionale *target space* beschouwen als het produkt van een kleine zes-dimensionale ruimte met een vierdimensionale ruimtetijd. Deze procedure van compactificatie is de standaard manier om de snaartheorie te relateren aan elementaire deeltjesfysica in vier dimensies. De extra dimen-

sies z  
theor  
ing in  
vier-d  
comp  
den.  
bepaa  
in te

De or  
en bo  
een ar  
aanslu  
intern  
ificati  
dualit  
sterke  
kopp  
brach  
regim  
van ee  
kan w  
theori  
beken  
dat he  
sies z  
rol. J

Snaar  
objec  
moet  
belan  
alisat  
een c  
bewe  
oppe  
bran  
inver  
bena  
snare  
vers  
bepa  
actie  
derg

$\sim 10^{19} \text{ GeV}$ , die met de golflengte van deze energie hoort, tot zo'n unificatie

de unificatie van de theorieën. We stellen we dat de snaren bewegen. De beweging van een snaar door een stap van de snaar ressembleren met de vrijheidsgraden tussen snaren. De opeenvolging vinden van snaartheorieën geschreven als een keten moet zijn dan groter dan 1, is het verloop van actueel

van symmetrie. Snaartheorie bevat dat ze moeten symmetrieën van hoge symmetrie tonen aan elkaar. Het is die uitsluitend van supersymmetrie. Dit zijn de IIB) en twee consistent in hun verwachtingen echter

veronderstellen worden in heden het produkt van benaderd worden. De dimensionale *target* met een vier-manier om de extra dimen-

sies zijn gecomcompactificeerd (of opgerold) en de eigenschappen van de vier-dimensionale theorie zijn afhankelijk van de meetkunde van de compacte ruimte. Een korte inleiding in deze procedure kan gevonden worden in Hoofdstuk 2. Hoewel in de snaartheorie vier-dimensionale modellen van deeltjes teruggevonden kunnen worden, zijn er andere compactificaties die evenzeer mogelijk zijn en waartussen geen keuze gemaakt kan worden. Het probleem is dat de snaartheorie uit het grote aantal compactificaties niet een bepaalde compactificatie kiest. Dit probleem wordt deels opgelost door een extra element in te brengen, dualiteit, dat hieronder wordt beschreven.

De ontdekking van dualiteit in de snaartheorie heeft ons begrip van de theorie uitgebreid en bovengenoemde problemen verhelderd. Dualiteit stelt dat een theorie equivalent is aan een andere theorie. Deze dualiteitsrelatie zorgt ervoor dat alle vijf snaartheorieën op elkaar aansluiten. Dualiteit relateert bijvoorbeeld twee theorieën die in verschillende opgerolde interne ruimtes gecomcompactificeerd zijn. Dit lost het probleem van de keuze van compactificatie deels op, aangezien veel van de compactificaties equivalent zijn. Overigens geeft dualiteit ook informatie over het niet-perturbatieve gedrag van de theorie. Een theorie met sterke koppeling (niet-perturbatief) gedraagt zich net als een andere theorie met zwakke koppeling (perturbatief). Een van de belangrijke nieuwe inzichten die dualiteit heeft gebracht is dat alle vijf modellen dezelfde theorie representeren in vijf verschillende fysische regimes, dit wil zeggen, in vijf verschillende perturbatieve variabelen. Dit leidt tot het idee van een onderliggende theorie, die als niet-perturbatieve oorsprong van de snaartheorieën kan worden gezien. Deze wordt M-theorie genoemd. Men heeft uitgevonden dat deze theorie in een bepaalde benadering elf-dimensionaal wordt maar het is nog niet geheel bekend welke de fundamentele vrijheidsgraden van de M-theorie zijn. Men vermoedt dus dat hoewel de snaartheorie in tien dimensies existeert, de ultieme formulering in elf dimensies zou moeten zijn. Voor het bestaan van dualiteit speelt supersymmetrie een cruciale rol. Juist daarom blijkt alleen supersnaartheorie deze bijzondere eigenschap te hebben.

Snaartheorie bevat solitonen, die worden beschreven als hoger dimensionale dynamische objecten. Ook al is de perturbatieve definitie in termen van snaren, niet-perturbatief moeten we ook deze hoger dimensionale objecten toevoegen. Deze solitonen spelen een belangrijke rol in het bestaan van dualiteiten. Ze worden  $p$ -branen genoemd (als generalisatie van het membraan), voor  $p$  ruimtelijke dimensies. Zo is bijvoorbeeld een 0-braan een deeltje, een 1-braan een snaar, een 2-braan een membraan, enzovoort. Net zoals de beweging van een snaar een oppervlak geeft, zo geeft een  $p$ -braan een  $(p+1)$ -dimensionaal oppervlak, het *worldvolume*. Men concludeert dat snaartheorie een theorie van snaren en branen is. Branen zijn intrinsiek niet-perturbatief omdat hun massa evenredig is met een inverse macht van de koppelingsconstante, ze worden dus heel zwaar bij perturbatieve benadering. Daarom kunnen de branen niet zo makkelijk gequantiseerd worden als de snaren. Er kunnen wisselwerkingen optreden tussen branen en snaren, waardoor nieuwe verschijnselen in de snaartheorie kunnen worden ondergebracht. Deze wisselwerkingen bepalen de dynamica van de  $p$ -braan. Deze dynamica wordt bepaald door de effectieve actie, waarbij de dynamische velden de verschillende fluctuaties van de braan zijn. Een dergelijke actie bevat bijvoorbeeld scalaire velden die de positie van de braan in de *target*



*space* aangeven. Deze velden zijn gekoppeld aan de achtergrond, die bepaald wordt door de theorie waarin de braan zich kan propageren. De achtergrond kan beschouwd worden als de fluctuaties van de *target space*. Aangezien de dualiteit relaties tussen de verschillende snaren en M-theorie impliceert, moet dualiteit ook gelden voor de niet-perturbatieve solitonen van de theorie, de branen. Het bestuderen van branen en hun dynamica kan dus gebruikt worden als test voor de dualiteiten in de snarentheorie en het bestaan van M-theorie. Dit proefschrift bevat een beschrijving van de dynamica van branen in de verschillende supersnaartheorieën en geeft verder bewijzen voor het bestaan van dualiteiten en M-theorie. De resultaten die in dit werk gepresenteerd worden, zijn tweërlei. Ten eerste geven we aan hoe de dualiteiten geïmplementeerd moeten worden in de acties die de dynamica van de branen beschrijven. Ten tweede presenteren we verschillende eigenschappen van deze branen en relateren die aan de eigenschappen van andere branen door middel van dualiteiten. Dergelijke eigenschappen kunnen worden afgeleid uit de effectieve actie van de braan.

De opzet van dit proefschrift is als volgt. Hoofdstuk 1 is een inleiding in snaartheorie en dualiteiten, waarin de verschillende supersnaartheorieën en de branen van elke theorie gepresenteerd worden. In Hoofdstuk 2 onderzoeken we de procedure van compactificatie in snaartheorie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de Scherk-Schwarz-methode om massa's toe te voegen tijdens compactificatie. Hoofdstuk 2 kan worden overgeslagen door de lezer die uitsluitend geïnteresseerd is in braan-acties en dualiteiten.

Hoofdstuk 3 gaat over de dynamica van de branen. We geven een overzicht van de verschillende acties en een beschrijving van de dynamica van de branen met behulp van branen die eindigen op andere branen. Hiermee bedoelen we dat de rand van een braan op een andere braan ligt en overeenkomstig de dynamica van deze grens de dynamica van de gastheerbraan bepaalt. Dit Hoofdstuk legt de notatie en de resultaten vast die gebruikt worden in de verdere Hoofdstukken voor de beschrijving van de dynamica van branen.

In Hoofdstuk 4 bestuderen we de braan-acties in het kader van dualiteiten in de snaartheorie. De dualiteitsrelaties die tussen de theorieën bestaan, moeten ook tussen de effectieve acties van deze branen terug te vinden zijn. In dit Hoofdstuk hebben we twee dingen gedaan: het testen van de dualiteiten, en het gebruiken van de dualiteiten om resultaten mee af te leiden. We tonen de dualiteiten aan tussen verschillende acties en construeren aan de hand daarvan de actie van bepaalde branen die nog niet bekend waren.

Elke braan speelt als het ware een bepaalde rol in de snaartheorie. Voor de 9-braan wordt dit beschreven in Hoofdstuk 5. Hier vinden we dat de 9-braan, die de gehele ruimtetijd vult, als een filter voor snaren werkt. Dit betekent dat de snaar die beweegt in de achtergrond van een 9-braan, een bepaalde projectie van het spectrum ondergaat. Dit heeft als consequentie dat een bepaald snaartype (type II) dat binnen een 9-braan beweegt, zich als een andere theorie (type I) gedraagt. We geven voor elke type-II-theorie de 9-braan-effectieve-actie en de bijbehorende symmetrie waarmee de theorie geprojecteerd wordt. We beschrijven ook deze projecties en voorts hoe we type I en de andere type snaren terugvinden. Ten slotte geven we een unificatie plaatje van deze constructies in termen

## SAMENVATTING

die bepaald wordt door  
kan beschouwd worden  
ies tussen de verschil-  
r de niet-perturbatieve  
en hun dynamica kan  
ie en het bestaan van  
van branen in de ver-  
estaan van dualiteiten  
n, zijn tweërlei. Ten  
vorden in de acties die  
ve verschillende eigen-  
an andere branen door  
geleid uit de effectieve

leiding in snaartheorie  
branen van elke theorie  
van compactificatie in  
-methode om massa's  
geslagen door de lezer

een overzicht van de  
branen met behulp van  
rand van een braan op  
s de dynamica van de  
aten vast die gebruikt  
namica van branen.

iteiten in de snaartheo-  
k tussen de effectieve  
bben we twee dingen  
liteiten om resultaten  
acties en construeren  
kend waren.

ie. Voor de 9-braan  
braan, die de gehele  
snaar die beweegt in  
pectrum ondergaat. Dit  
een 9-braan beweegt,  
ke type-II-theorie de  
theorie geprojecteerd  
de andere type snaren  
onstructies in termen

## SAMENVATTING

173

van M-theorie. Deze resultaten leveren nieuwe relaties op tussen de snarentheorieën en leveren mogelijk een wijze om de kennis van de niet-perturbatieve limiet van de theorie uit te breiden.